

基于动态缩聚的残余力向量法损伤识别研究

刘婉如, 任宜春

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对复杂结构损伤识别中单元和节点数量众多、难以检测的问题, 本文提出一种基于动态缩聚的残余力向量方法。该方法通过保留结构的有效自由度进行缩聚, 并对前几阶残余力向量的绝对值求和, 以实现损伤定位。建立简单的悬臂梁结构和空间桁架结构有限元模型, 设置多种损伤工况, 模拟并识别结构损伤。数值结果表明: 以提出的基于动态缩聚的残余力向量作为识别指标, 对结构损伤具有较高的敏感性。仅需结构的前几阶模态信息, 即可快速准确地识别出结构损伤, 为大型复杂结构的损伤识别提供了一种新方法。

关键词: 桁架结构; 损伤识别; 残余力向量; 模型修正

中图分类号: TU311.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)08-0020-006

doi:10.13402/j.gcjs.2025.08.097

Research on damage identification based on residual force vector method of dynamic condensation

LIU Wanru, REN Yichun

(College of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: Aiming at the problem of large number of units and nodes in the identification of damage in complex structures, a residual force vector method based on dynamic condensation is proposed. The method condenses by preserving the effective degrees of freedom of the structure and sums the absolute values of the residual force vectors of the previous structure to achieve damage localization. A simple finite element model of cantilever beam structure and space truss structure is established, and a variety of damage conditions are set to simulate and identify structural damage. The numerical results show that the proposed residual force vector based on dynamic condensation is used as the identification index, which has a high sensitivity to structural damage. Only the first few modal information of the structure is needed to quickly and accurately identify structural damage, which provides a new method for damage identification of large and complex structures.

Key words: truss structure; damage identification; residual force vector; model updating

在建筑物、构筑物漫长的服役期间, 由于长期外力荷载作用以及内部疲劳影响, 结构中不可避免地会产生不同程度的损伤。若未能及时发现并处理这些损伤, 可能会对结构的安全性和稳定性造成严重威胁, 甚至导致社会经济损失和公众安全问题。因此, 结构损伤的检测与识别显得尤为重要。

基于结构动力参数的损伤诊断方法种类繁多, 其中残余力向量法因具有概念清晰、检测方便、识别效果良好等优点, 吸引了众多国内外学者的深入研究。KOSMATK 等^[1]详细阐述了残余力向量法的原理, 并通过一空间桁架的4种损伤情况进行测试, 成功取得了试验数据, 有力验证了该方法的可靠性; LU 等^[2-3]创新性地引入残余应变能的概

收稿日期: 2024-09-26

作者简介: 刘婉如(2000—), 女, 硕士研究生, 从事结构健康监测方面的研究。

念,同时结合灵敏度分析的方法,仅依靠静态位移数据即可准确识别出结构损伤的位置和程度,为结构健康监测提供了新方法;NOBAHARI等^[4]首先以残余力作为指标确定损伤位置,极大减少了变量数量,随后运用遗传算法精准计算单元的损伤程度;刘济科等^[5]针对模型缩聚可能带来的误差,对残余力向量法的计算进行了全面优化,使得仅需一阶模态参数便可有效进行损伤识别,大幅减少了需要识别的内容;张干等^[6]将残余力向量作为损伤指标,成功应用于有上部结构的高桩码头基桩损伤诊断研究中,为高桩码头基桩结构损伤诊断提供了一种全新思路;杨秋伟等^[7]巧妙利用静力测试位移数据,并结合结构有限元模型的刚度矩阵,定义了静力残余力向量,无需进行模态分析等复杂操作,即可顺利完成结构损伤识别,并通过静力试验验证了其准确性;康哲民等^[8]充分考虑模态振型的不完备性,提出了一种改进的残余力向量法,以简支梁为例进行数值模拟,结果表明:该方法能够减少无关单元变量的计算,降低残余力向量的维度,且具有较好的噪声鲁棒性;宋春福等^[9]提出一种结合 LSTM 神经网络与残余力向量法的方法,采用两步法:先利用残余力向量准确判断结构损伤位置,再通过神经网络从子结构出发计算结构单元的损伤程度;曹震雄等^[10]从结构振动方程出发,经过严谨推导得出基于时域残余力向量的表达式,并以武汉军山大桥模型为例进行模拟,结果表明:该方法在单点激励和多点激励下均可高精度识别损伤发生的时刻、位置和程度。

总体而言,残余力向量法在结构损伤识别方面表现出色,具有较高的精度。本文基于 GUYAN 等^[11]的静态缩聚方法对模型进行动态缩聚^[12],进而计算残余力向量,提出一种新的损伤定位指标。以结构简单的悬臂梁及结构较为复杂的空间桁架结构为研究对象,通过详细的理论分析与精确的数值模拟验证,充分说明该方法的有效性和实用性,以期对结构损伤检测与识别领域提供新的思路和方法。

1 动态缩聚方法

在对结构自由振动微分方程进行求解后,若

忽略结构阻尼的影响,则可将具有 n 个自由度的结构的特征方程可以表示为

$$(\mathbf{K} - \lambda_j \mathbf{M}) \varnothing_j = 0 \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 和 \mathbf{K} 分别为结构 $n \times n$ 阶整体质量矩阵和整体刚度矩阵; λ_j 和 \varnothing_j 分别为结构固有频率的第 j 阶特征值和特征向量。

通过将结构的所有自由度划分为 m 个主自由度和 s 个从自由度,可将式(1)改写为

$$\left(\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{mm} & \mathbf{K}_{ms} \\ \mathbf{K}_{ms}^T & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} - \lambda_j \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{mm} & \mathbf{M}_{ms} \\ \mathbf{M}_{ms}^T & \mathbf{M}_{ss} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \varnothing_m \\ \varnothing_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{K}_{mm} 为刚度矩阵 \mathbf{K} 按主自由度划分得到的 $m \times m$ 阶分块刚度矩阵; \mathbf{K}_{ss} 为刚度矩阵 \mathbf{K} 按从自由度划分得到的 $s \times s$ 阶分块刚度矩阵; \mathbf{K}_{ms} 和 \mathbf{K}_{ms}^T 即为剩余分块矩阵; \mathbf{M}_{mm} 、 \mathbf{M}_{ss} 、 \mathbf{M}_{ms} 、 \mathbf{M}_{ms}^T 为质量矩阵 \mathbf{M} 所对应的分块矩阵; $\varnothing_{m,j}$ 与 $\varnothing_{s,j}$ 分别为结构主自由度振型与从自由度振型。

根据式(2)第二行,可知自由度振型 $\varnothing_{s,j}$ 与主自由度振型 $\varnothing_{m,j}$ 关系为

$$\varnothing_{s,j} = -(\mathbf{K}_{ss} - \lambda_j \mathbf{M}_{ss})^{-1} (\mathbf{K}_{ms}^T - \lambda_j \mathbf{M}_{ms}^T) \varnothing_{m,j} \quad (3)$$

设坐标转换矩阵 \mathbf{T} 表示 $\varnothing_{s,j}$ 和 $\varnothing_{m,j}$ 的关系,即 ($\varnothing_{s,j} = \mathbf{T} \varnothing_{m,j}$), 则 \mathbf{T} 可表示:

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= -(\mathbf{K}_{ss} - \lambda_j \mathbf{M}_{ss})^{-1} (\mathbf{K}_{ms}^T - \lambda_j \mathbf{M}_{ms}^T) \\ &= -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{ms}^T + \lambda_j \mathbf{K}_{ss}^{-1} (\mathbf{M}_{ms}^T + \mathbf{M}_{ss} \mathbf{T}) = \mathbf{T}_G + \mathbf{T}_d \end{aligned} \quad (4)$$

其中:

$$\mathbf{T}_G = -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{ms}^T \quad (5)$$

$$\mathbf{T}_d = \lambda_j \mathbf{K}_{ss}^{-1} (\mathbf{M}_{ms}^T + \mathbf{M}_{ss} \mathbf{T}) \quad (6)$$

式中:下标“G”为与 GUYAN 静态缩聚法^[10]相关的常量,变量 \mathbf{T}_d 将通过迭代过程得到。

则结构整体特征向量 \varnothing_j 可表示为

$$\varnothing_j = \begin{Bmatrix} \varnothing_m \\ \varnothing_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_m \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} \varnothing_{m,j} = \mathbf{P} \varnothing_{m,j} \quad (7)$$

式中: \mathbf{P} 为 \varnothing_j 和 $\varnothing_{m,j}$ 关系的坐标转换矩阵; \mathbf{I}_m 为维度 $m \times m$ 的单位矩阵。

将式(7)代入结构特征方程,并左乘 \mathbf{P}^T 得结构的缩聚特征方程:

$$(\mathbf{K}_R - \lambda_j \mathbf{M}_R) \varnothing_{m,j} = 0 \quad (8)$$

式中: T_G 为与 GUYAN 静态缩聚法^[11] 相关的常量, 变量 T_d 将通过迭代过程得到。

其中刚度矩阵 K_R 和质量矩阵 M_R 分别表示为

$$K_R = K_{mm} + K_{ms}T + T^T K_{ms}^T + T^T K_{ss}T \quad (9)$$

$$M_R = M_{mm} + M_{ms}T + T^T M_{ms}^T + T^T M_{ss}T \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入式(8)得^[12]:

$$K_R - \lambda_j M_R = [K_{mm} + K_{ms}(T_G + T_d)] + (T_G + T_d)^T [K_{ms}^T + K_{ss}(T_G + T_d)] - \lambda_j \{ [M_{mm} + M_{ms}(T_G + T_d)] + (T_G + T_d)^T [M_{ms}^T + M_{ss}(T_G + T_d)] \} = K_G - \lambda_j M_d = 0 \quad (11)$$

其中:

$$K_G = K_{mm} + K_{ms}T_G \quad (12)$$

$$M_d = M_{mm} + M_{ms}T + T_G^T (M_{ms}^T + M_{ss}T) \quad (13)$$

式中: K_G 和 M_d 为忽略惯性常量后所得的缩聚后结构刚度矩阵和质量矩阵; 其余参数参照前文可得。

结合式(11), 可将式(4)改写为

$$T = -K_{ss}^{-1} K_{ms}^T + \lambda_j K_{ss}^{-1} (M_{ms}^T + M_{ss}T) = T_G + K_{ss}^{-1} (M_{ms}^T + M_{ss}T) M_d^{-1} K_G \quad (14)$$

结构缩聚后, 其转换矩阵 T 可基于式(4)、(14)迭代计算后得出; K_G 可由式(12)直接计算得出; M_d 可基于式(13)、(14)迭代计算后得出。缩聚模型特征值 λ_j 和特征向量 $\varnothing_{m,j}$ 可通过特征方程式(11)求解得到, 结构整体特征向量 \varnothing_j 可由式(7)转换得到。

本文根据结构本身受力特性出发, 通过保留相关有效自由度, 对结构模型进行动态缩聚实现对结构的简化分析, 为后文残余力向量的计算减少无量纲。

2 损伤识别指标的提出

2.1 基于动态缩聚的残余力向量值计算

对于损伤结构而言, 其缩聚之后的特征方程表示为

$$(K_G^* - \lambda_j^* M_d^*) \varnothing_{m,j}^* = 0 \quad (15)$$

式中: M_d^* 和 K_G^* 分别为动态缩聚后, 损伤结构的质量矩阵和刚度矩阵; λ_j^* 和 $\varnothing_{m,j}^*$ 分别为动态缩聚后损伤结构的第 j 阶特征值和特征向量。

在实际工程中, 结构在发生损伤前后, 其质量变化通常极小。基于此, 可以合理地假设结构

在损伤前后质量没有产生变化, 而仅仅只有刚度发生了变化, 由此可得:

$$K_G^* = K_G - \Delta K_G \quad (16)$$

式中: ΔK_G 为损伤前后刚度矩阵变化值。

将式(16)代入式(15), 可得:

$$(K_G - \lambda_j^* M_d) \varnothing_{m,j}^* = \Delta K_G \varnothing_{m,j}^* \quad (17)$$

令

$$b_{m,j} = (K_G - \lambda_j^* M_d) \varnothing_{m,j}^* \quad (18)$$

式中: $b_{m,j}$ 为结构动态缩聚之后的第 j 阶残余力向量。

则式(17)可表示为

$$b_{m,j} = \Delta K_G \varnothing_{m,j}^* \quad (19)$$

式中: $b_{m,j}$ 为结构动态缩聚之后的第 j 阶残余力向量。

基于模型动态缩聚, 将式(19)的残余力向量方程改写为

$$\begin{bmatrix} \Delta k_{G1}^T \\ \Delta k_{G2}^T \\ \vdots \\ \Delta k_{Gm}^T \end{bmatrix} \varphi_{m,j}^* = \begin{Bmatrix} b_{m,j1} \\ b_{m,j2} \\ \vdots \\ b_{m,jm} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

式中: $b_{m,jm}$ 为结构缩聚后第 j 阶第 m 个自由度所对应的残余力向量值; Δk_{Gm}^T 为 ΔK_G 中第 m 个自由度对应的刚度矩阵值。

此方程为进一步分析和计算结构的残余力向量提供了具体的表达式。通过对各个子矩阵的运算, 可以更加深入地了解结构在动态缩聚后的力学行为和损伤特征。

2.2 损伤定位指标

在理想状态下, 假设结构处于第 j 阶模态。若结构某一单元中存在损伤, 则可以明确得知该单元对应自由度的残余力向量不为 0, 即 $b_{m,j} \neq 0$, 而其他未受损单元的残余力向量为 0。将同一节点各自由度的残余力向量绝对值相加, 得到各节点的残余力向量值, 即

$$b_{m,j}^i = \sum_{n=1}^k |b_{m,j,n}^i| \quad (21)$$

式中: $b_{m,j}^i$ 为结构第 i 节点对应第 j 阶残余力向量之和; $b_{m,j,n}^i$ 为结构第 i 个节点对应第 n 个自由度; k 为第 i 个节点对应有效自由度数量。

考虑到结构不同位置的单元对不同模态的敏

感程度存在差异, 为了更加准确地确定结构的损伤位置, 通过计算结构前几阶模态残余力向量值之和作为损伤定位指标。具体而言, 采用前 3 阶模态进行分析, 从而有效确定结构损伤位置, 可得定位指标 b_m^i 。

$$b_m^i = b_{m,1}^i + b_{m,2}^i + b_{m,3}^i \quad (22)$$

通过分析节点的残余力向量值以及节点与单元的位置关系, 可以推断出可能存在的损伤单元。

3 数值模拟分析

3.1 悬臂梁结构损伤识别

某悬臂梁结构如图 1 所示。该悬臂梁共有 10 个单元(图 1 中罗马数字), 11 个节点(图 1 中阿拉伯数字), 每单元长度为 0.1 m, 横截面尺寸为 0.03 m × 0.05 m, 弹性模量为 2.06×10^{11} Pa, 质量密度为 $7\,850 \text{ kg/m}^3$, 泊松比为 0.3。除去支座约束, 该结构共有 60 个自由度。结构的损伤以单元弹性模量的折减来模拟, 悬臂梁设定的损伤工况如表 1 所示。

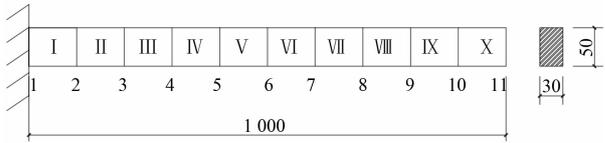


图 1 悬臂梁结构 mm

利用 Ansys 软件计算得到结构在损伤前后竖向振动的前 3 阶固有频率和振型。考虑到悬臂梁在实际使用中弯曲效应显著, 因此保留节点的竖向位移和对应的转动自由度进行模态缩聚。这种

表 1 悬臂梁损伤工况模拟

损伤工况	单元损伤位置	单元对应节点
D ₁	6	6、7
D ₂	6	6、7
D ₃	3	3、4
	6	6、7
D ₄	3	3、4
	4	4、5

有针对性的处理方式不仅能够更加准确地反映悬臂梁在弯曲状态下的力学特性, 而且通过模态缩聚大幅减少了计算量, 从而提升了计算效率。

悬臂梁结构各工况计算情况如表 2 所示。由表 2 可知: 在 D₁、D₂ 工况下, 结构在第 6、7 节点存在残余力向量。根据单元与节点的位置关系, 可以准确判定结构的损伤位置位于第 6 单元。此外, 进一步研究表明, D₁、D₂ 工况下的残余力向量值与单元损伤程度呈正相关。这表明, 随着单元损伤程度的加剧, 残余力向量值亦随之增大, 这一结果与实际工程情况相符。

在 D₃ 工况下, 结构在第 3、4、6、7 节点存在残余力向量。根据单元与节点的位置关系, 可以准确判定结构的损伤位置分别位于第 3 单元和第 6 单元。这一结果再次验证了通过残余力向量与节点位置关系进行损伤定位的有效性。即使在多位置损伤的情况下, 该方法仍能精准确定损伤单元。

在 D₄ 工况下, 结构各节点的残余力向量之和的情况。据此可准确判定结构的损伤位置分别位于第 3 单元和第 4 单元。在此情况下, 由于 4 节点

表 2 悬臂梁工况计算

节点编号	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	36 640.59	34 966.95
4	0	0	36 640.59	15 028.17
5	0	0	0.00	30 731.66
6	23 989.08	33 565.66	24 404.98	0
7	23 989.08	33 565.66	24 404.98	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0

受到两个单元的共同影响,其残余力向量值明显小于其他两个节点。这一结果与实际情况相符,进一步证明了基于残余力向量进行结构损伤定位的准确性和可靠性。

3.2 空间桁架结构损伤识别

空间桁架结构如图 2 所示。利用 Ansys 软件,采用 Beam188 单元建立有限元模型。其中,平面杆件为正方形钢管,厚度为 1.5 mm,外径为 20 mm,弹性模量为 2.06×10^{11} Pa,质量密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3;连接杆件为圆形钢管,厚度为 1.5 mm,外径为 20 mm,弹性模量为 2.06×10^{11} Pa,质量密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3,长度为 300 mm。该结构共有 32 个节点,总计 180 个自由度(已除去 24 个支座自由度)。由于此空间桁架结构的节点与单元数量较多,单元与节点的具体关系在此省略,其中预设损伤单元标黑表示,且在表 3 中列出损伤单元对应的节点情况。

通过调整单元的弹性模量来模拟损伤,所设定的损伤工况如表 3 所示。利用 Ansys 软件计算得到结构在损伤前后竖向振动的前 3 阶固有频率和振型。结合空间桁架的受力特点及测量的便利性,保留结构节点的平面自由度进行模态缩聚。

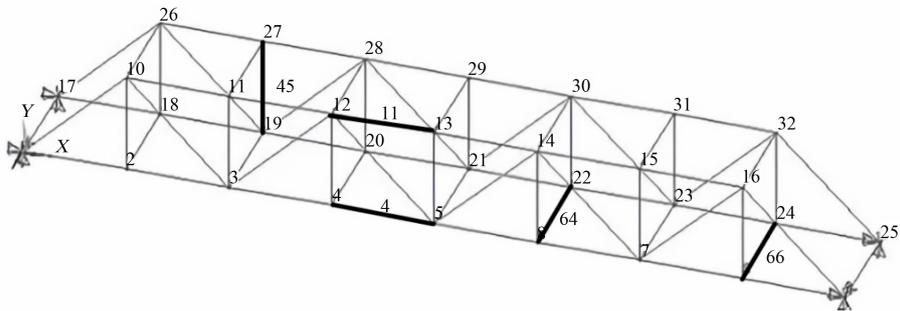
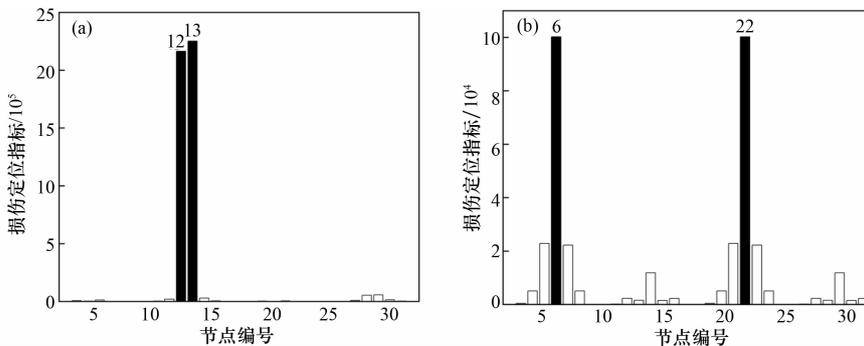


图 2 空间桁架结构



(a) D₁; (b) D₂

图 3 空间桁架 D₁、D₂ 工况

表 3 空间桁架损伤工况模拟

损伤工况	单元损伤位置	单元对应节点
D ₁	11	12、13
D ₂	64	6、22
D ₃	4	4、5
	45	19、27
D ₄	4	4、5
	66	8、24

由于空间桁架结构节点众多,采用表格形式表示残余力向量占幅过大,此处采用柱状图表示具体各工况具体残余力向量计算情况。

D₁ 工况时,结构各节点残余力向量之和的情况如图 3(a)所示。由图 3(a)可知:结构在第 12、13 节点存在残余力向量,其他节点的值几乎为 0,可忽略不计。根据单元与节点的位置关系,可以准确判定结构的损伤位置位于结构第 11 单元。D₂ 工况时,结构各节点残余力向量之和的情况如图 3(b)所示。由图 3(b)可知:结构在第 6、22 节点存在残余力向量,其余节点的残余力向量值远小于第 6、22 节点。根据单元与节点的位置关系,可以准确判定结构的损伤位置位于结构第 64 单元。

D_3 工况时, 结构各节点残余力向量之和的情况如图4(a)所示。由图4(a)可知: 结构在第4、5、19、27节点处存在残余力向量。根据单元与节点的位置关系, 可以准确判定结构的损伤位置位于第4单元和第45单元。其中, 第45单元为竖向杆件, 由于本文选取的前3阶频率受竖向频率影响较大, 其残余力向量值的表现略逊于横向杆件。即便如此, 该方法仍然精准实现结构损伤定位, 充分体现了其在复杂结构中的有效性和可靠性。

D_4 工况时, 结构各节点残余力向量之和的情况如图4(b)所示。由图4(b)可知: 结构在第4、5、8、24节点处存在残余力向量。由于本文保留平面自由度进行缩聚, 空间桁架中平面连接杆件的残余力向量值会远小于平面杆件。因此, 第8、24节点的残余力向量值明显低于第4、5节点的值。然而, 即便在这种情况下, 仍然可以准确定位结构的损伤位置为第4单元和第66单元。这一结果进一步证明了该方法在空间桁架结构损伤检测中的准确性和适用性。

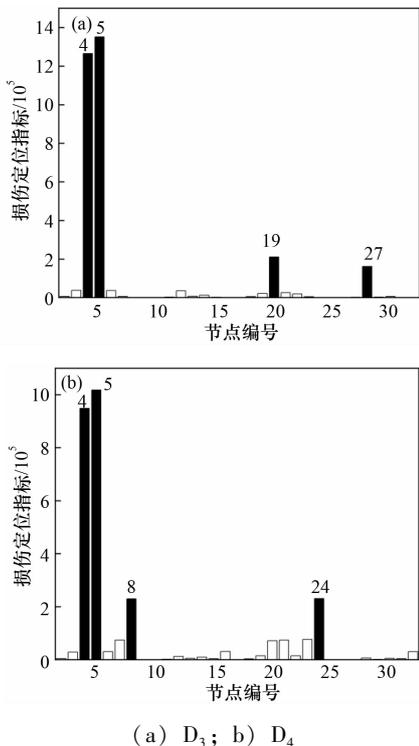


图4 空间桁架 D_3 、 D_4 工况

4 结论

(1) 在残余力向量损伤识别方法中创新性地

引入了动态缩聚的方法。充分考虑结构本身的特性与受力特点, 有针对性地进行结构模态缩聚。通过严谨的迭代计算, 一方面能够在减少无关变量的同时降低计算维度, 极大地提高计算效率; 另一方面, 显著提升了缩聚之后的计算精度, 为结构损伤的准确识别提供了坚实的基础。

(2) 提出的针对损伤结构前几阶单元各自由度残余力向量累加的损伤定位指标, 具有广泛的适用性和卓越的性能。无论是结构简单的悬臂梁, 还是工程状况较为复杂的空间桁架结构, 该指标均能以直观的方式精准实现对结构损伤的定位。它不仅能够准确诊断单一位置的损失, 确定其位置和程度, 而且在多位置损伤识别方面也表现出较好的效果, 能够有效识别多个损伤位置, 为结构的安全评估和维护提供了有力支持。

参考文献:

- [1] KOSMATKA J B, RICLES J M. Damage detection in structures by modal vibration characterization[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(12): 1384 - 1392.
- [2] LU Z R, ZHU J J, OU Y J. Structural damage identification using incomplete static displacement measurement[J]. Structural engineering & mechanics, 2017, 63(2): 251 - 257.
- [3] LU Z R, YAO R Z, LIU J K, et al. A two-step approach for damage identification in axially functionally graded beams[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 842: 012082.
- [4] NOBAHARI M, GHASEMI M R, SHABAKHTY N. Truss structure damage identification using residual force vector and genetic algorithm[J]. Steel & composite structures, 2017, 25(4): 485 - 496.
- [5] 刘济科, 杨秋伟. 基于残余力向量的结构损伤识别两步法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(4): 1 - 4.
- [6] 张干, 孙熙平, 王倩, 等. 基于残余力向量的高桩码头基桩损伤诊断研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(4): 188 - 192; 203.
- [7] 杨秋伟, 周聪, 李翠红, 等. 基于静力残余力向量的结构损伤评估方法[J]. 计算力学学报, 2021, 38(5): 625 - 630.
- [8] 康哲民, 雷能忠, 祖庆芝. 一种改进的残余力向量法在结构损伤识别中的应用[J]. 计算力学学报, 2024, 41(2): 263 - 269.

(下转第33页)

(2) 在降雨量较大且排水要求较高的地区, 透水混凝土的最佳配合比: 目标孔隙率为 24%、水胶比为 0.28, 钢渣掺量为 10%、锂渣掺量为 10%、粉煤灰掺量为 15%; 当对透水混凝土路面有较高承载能力要求时, 最佳配合比: 目标孔隙率为 15%、水胶比为 0.3, 钢渣掺量为 10%、锂渣掺量为 20%、粉煤灰掺量为 10%; 从固废替代效率的角度考虑, 最佳配合比: 目标孔隙率为 15%、水胶比为 0.32, 钢渣掺量为 15%、锂渣掺量为 30%、粉煤灰掺量为 15%。

(3) 基于功效系数法, 11[#]试块的 K_a 值最大, 达到 0.75, 因此其综合性能最优。该组试块的配合比: 目标孔隙率为 21%, 水胶比为 0.3, 钢渣掺量为 0%, 锂渣掺量为 10%, 粉煤灰掺量为 15%。

(4) 通过 SEM 分析发现, 未添加掺合料的透水混凝土孔隙率较高, 结构松散, 力学性能较差。而添加钢渣、锂渣和粉煤灰等固废材料后, 能有效填充孔隙, 并与水泥中的水化产物发生反应, 从而优化混凝土微观结构并提高其强度。

参考文献:

[1] 包永鹏. 工业固废资源化综合利用的策略与实践[J]. 选煤技术, 2024, 52(3): 9-16.

[2] 王晓青. 基于海绵城市理念的城市道路优化设计[J]. 大众标准化, 2024(22): 74-76.

[3] 黄金龙, 李景芳. 透水混凝土路面铺装的发展现状[J/OL]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(33): 64-66. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Y2E-z2Sa5COspDDF45NdkIVOpJ6cAW2NDtF6WR6Ax6NcDUSIAD3DamNxdDvgfY9W9RKNx9LylRS0zNJTT EIN5WO-4qFzUIvsFZzFFa-ykMGApc2FGaJ5RNzRu>

ZmoH8X6YrZi2pA4f2MeWRBEOyC8JWITRLSZwVgxtM8rFG-PU3cFo4dUQLqEIA = = &uniplatform = NZKPT & language = CHS.

[4] 蒙华良, 黄禧, 陈阳, 等. 工业固废制备低碳胶凝材料的研究进展[J]. 水泥工程, 2023(5): 75-78; 94.

[5] 林永权, 邓恺, 张宾. 几种典型高钙工业固废固碳技术研究现状及发展趋势[J]. 中国水泥, 2024(10): 49-53.

[6] 李梦娟, 李博楠. 透水混凝土基层抗堵塞试验设计及微观机理观测[J]. 工程建设, 2024, 56(7): 6-9.

[7] 石丽云. 矿物掺合料对透水混凝土硬化性能及微观结构的影响[J]. 福建建材, 2023(6): 9-12.

[8] 张延年, 王众新, 李志军, 等. 复合掺合料对混凝土的改性试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(6): 1100-1107.

[9] 张银松, 石贤增, 赵星晨, 等. 钢渣粉-玄武岩纤维对透水混凝土力学及透水性能的影响[J]. 湖北理工学院学报, 2024, 40(5): 46-50; 62.

[10] 韦祝, 付希尧, 张建, 等. 基于正交试验的再生透水混凝土路用性能研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(2): 17-22.

[11] 黄嘉祺, 沈卫国, 吕振杰, 等. 碳激发钢渣生态透水混凝土的制备与研究[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(3): 17-21.

[12] 丁伟正, 朱洪威, 程军旺. 基于正交试验的矿物掺合料透水混凝土性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(2): 6-10.

[13] 郭继东. 基于正交试验的透水混凝土强度和透水性影响研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(20): 99-103.

[14] YANGJ, JIANG G L. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3): 381-386.

[15] 茅兵海. 基于正交试验设计的透水混凝土物理力学性能研究[J]. 路基工程, 2021(1): 35-40.

(上接第 25 页)

[9] 宋福春, 杨子豪, 付聿旻, 等. 基于 LSTM 神经网络和残余力向量法的结构损伤识别[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(5): 872-879.

[10] 曹震雄, 翁顺, 李佳靖, 等. 基于时域残余力向量特征分解的结构损伤识别方法研究[J]. 振动工程学报, 2023, 36(6): 1516-1526.

[11] GUYAN R J. Reduction of stiffness and mass matrices[J]. AIAA Journal, 1965, 3(2): 380.

[12] WENG S, TIAN W, ZHU H P, et al. Dynamic condensation approach to calculation of structural responses and response sensitivities[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 88: 302-317.

[13] XIA Y, LIN RM. A new iterative order reduction (IOR) method for eigensolutions of large structures[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 59(1): 153-172.